

*Н. Батаа, А. В. Полькин, М. А. Самаркина, Н. А. Абаймов, В. Г. Тупоногов*  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург  
[Rav4195@gmail.com](mailto:Rav4195@gmail.com)

## КОЛЕБАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

*В работе изложены результаты исследования колебаний поверхности псевдоожигенного слоя. Проанализирован поверхностный слой. Приведён расчёт частоты колебания поверхности псевдоожигенного слоя.*

Ключевые слова: *псевдоожигение; колебания поверхности слоя, частота колебания.*

*N. Bataa, A. V. Polkin, M. A. Samarkina, N. A. Abaimov, V. G. Tuponogov*  
Ural Federal University, Ekaterinburg

## FLUCTUATIONS OF THE FLUIDIZED BED SURFACE

*The paper presents the study of fluidized bed fluctuations. The surface layer was analyzed. The calculation of the fluidized bed surface fluctuations frequency is given.*

Keywords: *fluidization; bed surface fluctuations, fluctuations frequency.*

Понимание гидромеханики псевдоожигения необходимо для разработки конструкций аппаратов современной энергетики: например, газификаторов, установок газоочистки с композиционными дисперсными сорбентами, реакторов для улавливания и сепарации CO<sub>2</sub>.

Колебания поверхности слоя имеют волнообразную форму, подобную волнам на поверхности ограниченного объема жидкости в сосуде. Форму волны поверхности слоя придает выходящий из слоя пузырь, который вначале вспучивает поверхность над собой, а затем, после прорыва поверхности слоя, образует на ней лунку.

Повторяющиеся изменения формы поверхности под действием последовательно выходящих пузырей и силы гравитации превращается в движение бегущих между стенками аппарата волн верхней границы слоя, т. е. гравитационные волны поверхности (рис. 1) [1].

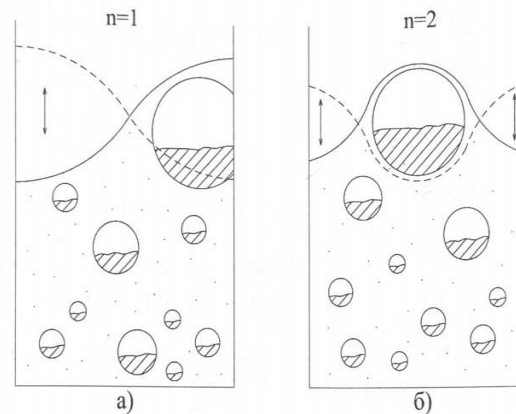


Рис. 1. Стоячие поперечные волны на поверхности псевдоожигенного слоя [2]:  
а – полуволновая мода,  $n = 1$ ; б – полноволновая мода,  $n = 2$

Поскольку поверхностные слои дисперсной среды совершают, в основном, вертикальные перемещения, а распространение волн происходит в горизонтальной плоскости, то поверхностные волны можно считать поперечными, в отличие от продольных волн давления при подъеме пузыря.

Расчет частотного спектра колебаний поверхности кипящего слоя выполнялся по формуле для частот колебаний жидкости в сосудах (1)

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g \cdot k_{nm} \tanh(k_{nm} H)} , \quad (1)$$

где  $k_{nm}$  – волновое число;  $H$  – высота псевдоожигенного слоя,

$$k_{nm} = \pi \sqrt{\left(\frac{n}{B}\right)^2 + \left(\frac{m}{L}\right)^2} , \quad (2)$$

где  $L$  – толщина слоя, м (0,025 м);  $B$  – ширина слоя, м (0,2–1,8 м);  $n, m$  – количество полуволн, в случае плоского слоя  $L = 0$ .

Для численного моделирования колебаний псевдоожигенного слоя использовалась программа OPEN FOAM. Использовалась плоская прямоугольная модель псевдоожигенного слоя.

Обработка полученных при моделировании видео изображений режимов псевдооживления заключалась в следующем:

- По перемещению поверхности слоя определялся период колебаний поверхности  $T$  путем фиксации числа итерационных шагов и расчету по формуле.

$$T = N \cdot \Delta\tau \quad (3)$$

где  $N$  – число шагов,  $\Delta\tau = 0,01$  с – временной интервал между итерациями.

- Определялась частота колебаний поверхности:

$$f_c = \frac{1}{T}, \text{ Гц.} \quad (4)$$

- Определялось число полувольт у поверхности –  $n$ .

Предварительно были проведены вычисления по восьми моделям трения. На рис. 2 приведен пример одного из полученных видеоизображений псевдооживленного слоя.

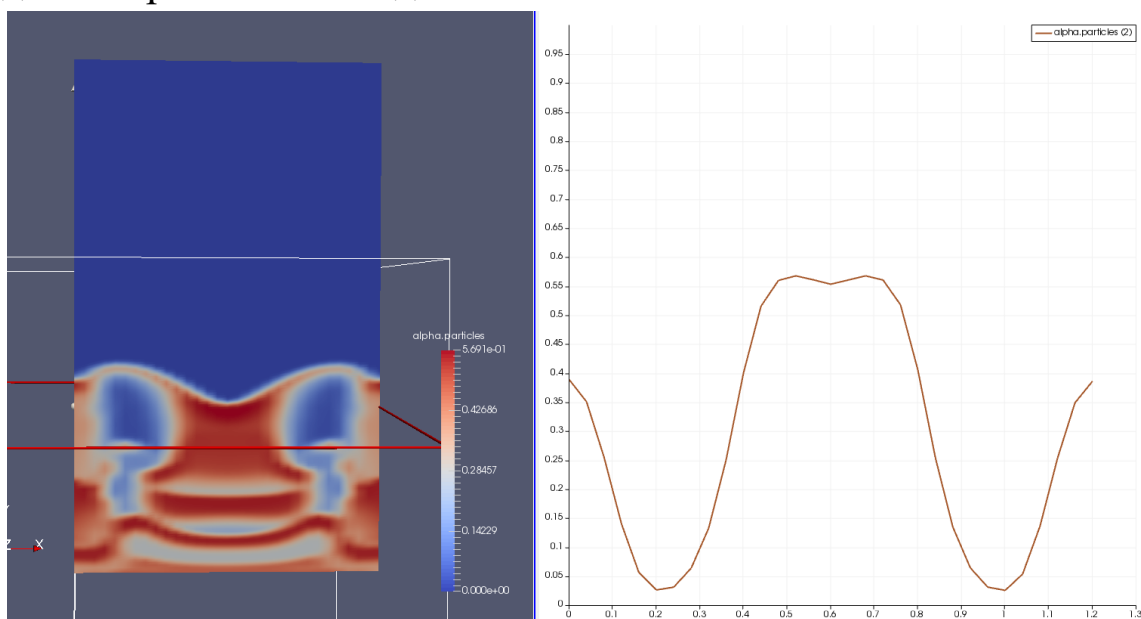


Рис. 1. Модель по Ergun:  $H = 0,5$  м;  $U = 0,5$  м/с,  $B = 1,2$  м;  $1,05$  с,  $n = 3$

На рис. 3 показано сравнение вычислений частоты колебаний по модели Ergun и по аналитической формуле (1) для мод колебаний с одинаковыми волновыми числами. За основную моду колебаний принималось выражение (5), которое дает хорошее совпадение с экспериментальными значениями.

$$f_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{q}{H_0}} \quad (5)$$

Эта зависимость была выявлена в качестве простейшей аналогии для расчета собственной частоты колебания слоя, при сравнении их с колебаниями жидкости в  $U$ -образной трубке [3].

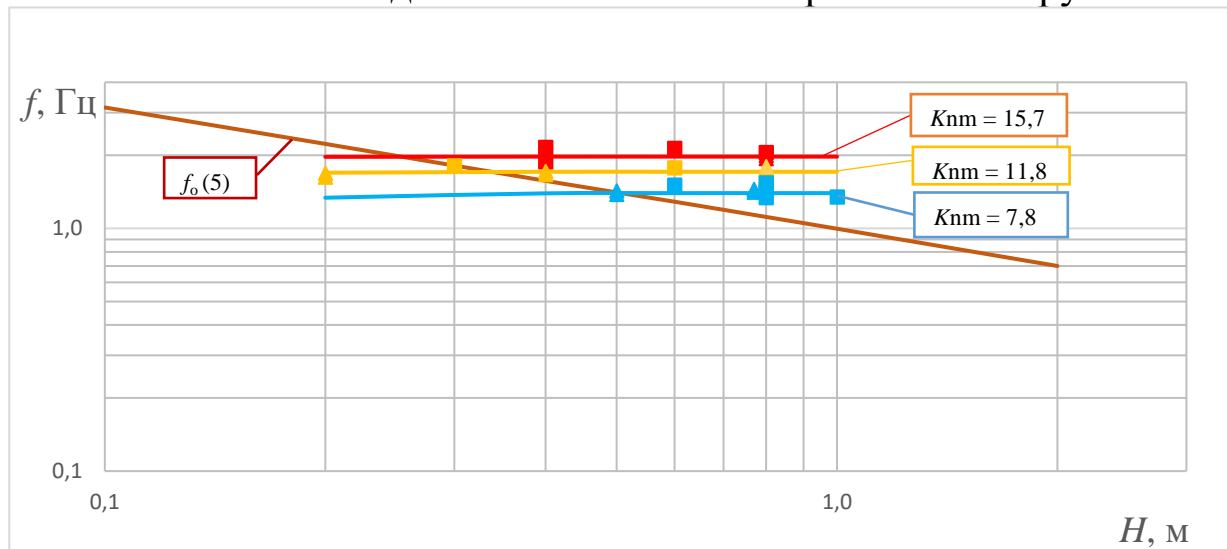


Рис. 3. Сравнение модельных значений частот мод колебаний поверхности слоя с аналитическими по формуле (1):

■ ■ ■ – модельные данные,  $f_0$  — зависимость (5)

Из сравнения данных следует, что зависимость частот мод колебаний поверхности слоя следует основной частоте колебаний слоя  $f_0$ , которая определяется механизмом прохождения крупных пузырей через слой. Наблюдаемые отклонения от зависимости  $f_0(H)$  можно объяснить случайным характером смены поверхностных волновых мод, поскольку при монотонном изменении высоты слоя  $H$ , изменение частоты колебаний поверхности слоя происходит дискретно при переходе с одной моды на другую.

#### Список использованных источников

1. Тупоногов В. Г., Рыжков А. Ф., Фаренбрух О. Е. О волновой природе гидродинамики кипящего слоя // XXVI Сибирский теплофизический семинар : тезисы докладов. Новосибирск : Институт теплофизики им С. С. Кутателадзе, 2002. С. 237–238.
2. Sun J., Chen M. M., Chao B. T. On the fluctuation motion due to surface waves in gas fluidized beds // Experimental heat transfer, fluid mechanics, and thermodynamics : Proc. of the First world conf. Dubrovnic, 1988. P. 1310–1318.
3. Баскаков А. П., Тупоногов В. Г., Филипповский Н. Ф. Механизм пульсаций давления в неоднородном кипящем слое // ИФЖ. 1983. Т. 45, № 3. С. 423–426.